

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.012.45.046

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА БЕЗ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННОГО БАНКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

канд. техн. наук, доц. Н.А. РАК, С.Ю. ТАМКОВИЧ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

На основе расширенного банка экспериментальных данных анализируются методы расчета прочности элементов из тяжелого бетона без поперечной арматуры при продавливании. С использованием расширенного банка экспериментальных данных выполнена оценка точности расчета норм проектирования, действующих на территории Республики Беларусь. Определен индекс надежности конструкций, обеспечиваемый при расчете по этим нормам проектирования. На основании анализа даны предложения по совершенствованию методов расчета железобетонных плит при продавливании.

Введение. Авторами в работах, опубликованных ранее, с помощью банка экспериментальных данных, выполнена оценка точности и надежности методик норм, действующих на территории Республики Беларусь: СНБ 5.03.01-02 [1] и европейских норм в виде ТКП EN 1992-1-1-2009 [2] с национальным приложением. Со временем появлялись новые доступные литературные источники, банк экспериментальных данных пополнялся, в результате общее количество образцов достигло 334, тогда как в первом банке, по которому проводилась оценка точности и надежности, а также давались рекомендации, было 260 образцов. На основании этого нами было принято решение о проведении оценки точности и надежности с учетом расширенного банка экспериментальных данных и выполнено сравнение с ранее полученными значениями.

Методы расчета. Изучение действующих на территории Республики Беларусь двух нормативных документов по расчету железобетонных конструкций показало, что они исходят из того, что прочность на продавливание зависит от периметра критического сечения, расчетной высоты плиты и сопротивления бетона на сжатие. При этом условие прочности железобетонных плит из тяжелого бетона на продавливание без поперечной арматуры может быть представлено в следующем обобщенном виде:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd,c} = f_{c,ps} \cdot u \cdot d, \quad (1)$$

где V_{Sd} – продавливающая сила; V_{Rd} – усилие, воспринимаемое бетоном плиты при продавливании; $f_{c,ps}$ – расчетное сопротивление бетона срезу при продавливании; u – периметр условного критического сечения; d – рабочая высота плиты.

Расчетное сопротивление бетона срезу при продавливании $f_{c,ps}$ может быть определено по следующей обобщенной формуле:

$$f_{c,ps} = \alpha_p \cdot \alpha_d \cdot f_{cs}, \quad (2)$$

Здесь f_{cs} – расчетное сопротивление бетона простому срезу; α_p – коэффициент, учитывающий влияние продольной рабочей арматуры плиты; α_d – коэффициент, учитывающий влияние масштабного фактора.

В таблице 1 представлены аналитические выражения и коэффициенты, входящие в формулы норм. При этом для наглядности анализа и упрощения аналитических зависимостей рассмотрен только вариант продавливания плиты перекрытия без поперечной арматуры, центрально сжатой колонной. В связи с этим дополнительные условия, представленные в нормах, учитываться не будут, так как было установлено, что выполнение этих условий происходит только при больших толщинах плит, что характерно для фундаментов, а также при использовании высокопрочных бетонов с малым процентом армирования.

В приведенных в таблице 1 зависимостях сохранены обозначения нормативных документов: f_{ck} , f_{ctk} – соответственно нормативные (цилиндрическое) сопротивления бетона осевому сжатию, растяжению, определенные с обеспеченностью 0,95 МПа; γ_c – коэффициент безопасности по бетону; l_c – длина стороны (диаметр) грузовой площадки; ρ_l – коэффициент продольного армирования; d – рабочая высота.

Таблица 1

Расчетные зависимости для расчета плит на продавливание

| Нормативный документ | f_{csh} | α_p | α_d | U |
|---|---|---|--|---|
| СНБ 5.03.01-02 [1] | $\frac{C_{Rd,c}}{\gamma_c} f_{ck}^{1/3}, C_{Rd,c} = 0,225$ | $(100\rho_l)^{1/3}$ $\rho_l \leq 0,02$ | $\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \leq 2$ | $sq: 4l_c + 3\pi d$ $C: \pi(l_c + 3d)$ |
| ТКП EN 1992-1-1:2009 [2] | $\frac{C_{Rd,c}}{\gamma_c} (f_{ck})^{1/3}, C_{Rd,c} = 0,18$ | $(100\rho_l)^{1/3}$ $\rho_l \leq 0,02$ | $\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \leq 2$ | $sq: 4l_c + 4\pi d$ $C: \pi(l_c + 4d)$ |
| СНБ 5.03.01-02 [1] с учетом поправки [3] | $\frac{C_{Rd,c}}{\gamma_c} f_{ck}^{1/3}, C_{Rd,c} = 0,24$ | $(100\rho_l)^{1/3}$ $\rho_l \leq 0,02$ | $\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right) \leq 2$ | $sq: 4l_c + 3\pi d$ $C: \pi(l_c + 3d)$ |
| sq – квадратная колонна; C – круглая колонна. | | | | |

Формирование банка экспериментальных данных. Первоначальный банк экспериментальных данных (БЭД) по испытаниям железобетонных элементов на местный срез [3] содержал 260 образцов, однако со временем появлялись новые доступные источники, в результате чего в банк добавлялись новые образцы, испытание большинства которых было выполнено в 2000-х годах. Среди таких работ следует выделить работы Tassinari (2007), Guidotti (2010), Sakinis (2009). Также в БЭД были добавлены образцы, испытание которых производилось в середине XX века. Это работы Base (1966), Monterola (1966) и Yitzhaki (1966). Все добавленные образцы соответствовали критериям, представленным в [3]. В результате общее число экспериментальных значений составило 334 образца. Учитывая значительное изменение количества образцов, а именно увеличение выборки приблизительно на 30 %, было принято решение о проведении повторной оценки точности и надежности методик расчета, представленных в [1; 2], а также предложенных в [3], и уточнить функцию продольного процента армирования [5] с использованием расширенного БЭД. Краткая характеристика образцов рабочей выборки дана в таблице 2, где представлены только те исследования, в которых общее количество опытных образцов превышало 3 штуки.

Таблица 2

Основная выборка с краткими данными опытных образцов

| Автор (год исследования) | Кол-во | d , мм | l_c , мм | f_c , МПа | ρ , % | V_{exp} , кН |
|-----------------------------|--------|-----------|-----------------------|-------------|-------------|----------------|
| Elstner (1956) | 26 | 114 ~ 117 | 254 ~ 355 | 10,3 ~ 40,4 | 0,9 ~ 3,7 | 303 ~ 579 |
| Kinnunen (1960) | 19 | 117 ~ 130 | Ø150 ~ 300 | 24,1 ~ 33,5 | 0,47 ~ 1,54 | 198 ~ 541 |
| Мое (1961) | 16 | 114 | 152 ~ 388 | 20,5 ~ 35,2 | 1,02 ~ 1,5 | 311 ~ 440 |
| Base (1966) | 18 | 102 ~ 124 | 203 | 14 ~ 41,4 | 1 ~ 1,9 | 247 ~ 541 |
| Monterola (1966) | 8 | 107 | 100 ~ 450 | 24,2 ~ 39,7 | 0,5 ~ 1,4 | 165 ~ 397 |
| Yitzhaki (1966) | 6 | 82 | 201; Ø119 ~ 300 | 10 ~ 18,1 | 0,5 ~ 8,5 | 98 ~ 239 |
| Kakuta (1974) | 22 | 120 ~ 170 | 100 ~ 300 | 15,4 ~ 53 | 0,79 ~ 3,37 | 190 ~ 750 |
| Regan (1980, 1986, 1993) | 26 | 93 ~ 200 | Ø50 ~ 250 | 11,92 ~ 58 | 0,58 ~ 1,52 | 123 ~ 825 |
| Iwaki (1985) | 5 | 95 | Ø98 ~ 408 | 25,6 ~ 26,1 | 1,0 ~ 2,0 | 178 ~ 384 |
| Tolf (1988) | 8 | 99 ~ 200 | Ø125 ~ 250 | 19,9 ~ 31,7 | 0,35 ~ 0,8 | 145 ~ 603 |
| Gardner (1990) | 8 | 81 ~ 124 | Ø76 ~ 203 | 14,5 ~ 52,1 | 0,47 ~ 2,14 | 108 ~ 357 |
| Hussein (1991) | 10 | 95 ~ 120 | 150 | 52,5 ~ 87,5 | 0,49 ~ 2,33 | 178 ~ 645 |
| Siao (1994) | 11 | 99 ~ 200 | 254; Ø125 ~ 300 | 22,9 ~ 34,7 | 0,79 ~ 1,54 | 194 ~ 603 |
| Ramdame (1996) | 13 | 98 ~ 102 | 150 | 26,9 ~ 68,4 | 0,6 ~ 1,3 | 169 ~ 341 |
| Sistonen (1997) | 10 | 170 ~ 177 | Ø201 ~ 901 | 24,1 ~ 32,7 | 0,45 ~ 1,17 | 478 ~ 1111 |
| Monterolla (2002) | 11 | 101 ~ 220 | 120 ~ 150; Ø240 ~ 250 | 23,4 ~ 57 | 0,69 ~ 2,86 | 208 ~ 1113 |
| Kosa (2003) | 5 | 170 | 300 | 26 ~ 42,9 | 0,54 ~ 0,85 | 609 ~ 716 |
| Liu Huang (2004) | 5 | 125 | 224 ~ 300 | 30,1 ~ 39,6 | 0,8 ~ 1,91 | 440 ~ 557 |
| Guandalini (2005) | 6 | 96 ~ 210 | 130 ~ 260 | 27,6 ~ 34,7 | 0,33 ~ 1,5 | 238 ~ 1023 |
| Hamada (2005) | 14 | 95 | 100 ~ 200 | 32,5 ~ 42,2 | 0,556 | 127 ~ 233 |
| Tassinari (2007) | 8 | 100 ~ 104 | 130 | 20,8 ~ 27,5 | 0,49 ~ 0,75 | 150 ~ 221 |
| Mirzaei (2008) | 12 | 102 | 130 | 31 ~ 40,4 | 0,49 ~ 1,41 | 211 ~ 295 |
| Sakinis (2009) | 6 | 106 ~ 112 | 200 | 27,2 ~ 37,3 | 0,5 ~ 1,5 | 295 ~ 403 |
| Guidotti (2010) | 14 | 194 ~ 208 | 260 | 31,5 ~ 51,7 | 0,77 ~ 1,62 | 763 ~ 1543 |

Для каждого экспериментального образца были определены значения теоретической разрушающей нагрузки при заданных исходных данных. Расчеты опытных образцов выполнены по методикам, указанным в таблице 1. При всех вычислениях использовались фактические (средние) значения

геометрических параметров образцов и прочностных характеристик материалов. Для каждой методики расчета определено отношение опытной и вычисленной (теоретической) несущей способности для каждого образца. Количественные отношения опытных образцов к отношению опытной к теоретической нагрузке представлены на рисунке 1.

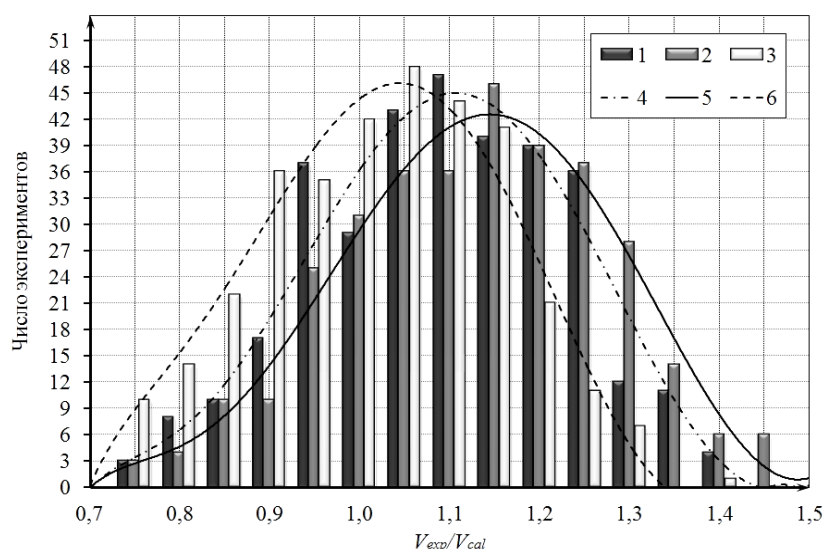


Рис. 1. Распределение отношений опытной нагрузки V_{exp} к теоретической V_{cal} для методов расчета, представленных в таблице 1, и аппроксимирующие кривые.
1 – [1]; 2 – [2]; 3 – [1] при $C_{Rd,c} = 0,24$;
4, 5, 6 – аппроксимирующие кривые при $C_{Rd,c} = 0,24$ соответственно для [1], [2], [1]

Из рисунка 1 видно, что распределения отношения опытной нагрузки к теоретической в общей совокупности близки к нормальному распределению для всех рассматриваемых методов расчета. Это свидетельствует о том, что формулы методик достаточно хорошо учитывают влияние всех факторов, а разброс значений вызван влиянием иных, не учитываемых формулами, условий.

Основные результаты оценки точности методов расчета представлены в таблице 3. При этом для наглядности в таблице также представлены значения поправки среднего значения b и коэффициента вариации величины рассеяния δ , полученные ранее в работе [3] при использовании первоначального банка данных.

Таблица 3

Основные результаты оценки точности методов расчета

| Параметры | Нормативный документ | | | | | |
|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|---------------------------|-------|
| | [1] | | [2] | | [1] при $C_{Rd,c} = 0,24$ | |
| Количество образцов в базе | 260 | 334 | 260 | 334 | 260 | 334 |
| Поправка среднего значения b | 1,123 | 1,073 | 1,164 | 1,106 | 1,045 | 1,012 |
| Коэффициент вариации V_δ | 0,139 | 0,129 | 0,155 | 0,142 | 0,140 | 0,128 |

Анализ результатов, представленных в таблице 3 и на рисунке 1, для расширенного БЭД, содержащего 334 образца, позволил сделать следующие *выводы*:

- 1) отклонения поправки среднего значения b близки к 1, не превышают 1,1 и отличаются друг от друга незначительно;
- 2) значения коэффициента вариации V_δ величины рассеяния δ не превышает 0,142;
- 3) незначительное отличие значений поправки среднего значения b и коэффициентов вариации V_δ величины рассеяния δ для методов расчета, по-видимому, обусловлено практически одинаковыми подходами к механизму разрушения от продавливания, а также одинаковыми расчетами прочности бетона на срез.

Уточнение зависимости для учета влияния продольного армирования. Ранее авторами в работах [4; 5] была предложена новая, линейная, зависимость (3) для учета влияния продольного процента армирования:

$$f_{\rho} = 0,35\rho + 0,65, \quad (3)$$

где ρ – процент продольного армирования.

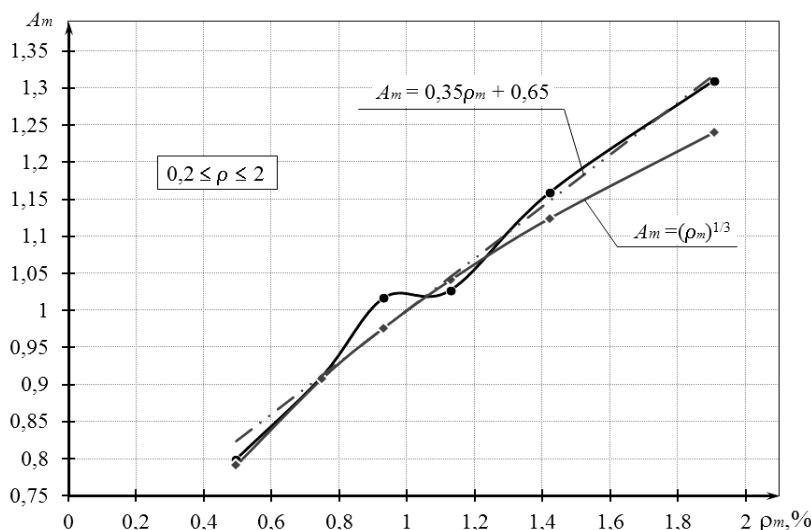
Принимая во внимание, что количество образцов в БЭД изменилось, нами осуществлено уточнение предлагаемой функции с учетом нового количества образцов. Для этого новый банк экспериментальных данных был разделен на группы образцов в зависимости от коэффициентов армирования, исходя из того, что $0,002 \leq \rho_l \leq 0,02$ согласно [1]. В результате было сформировано 6 групп образцов, представленных в таблице 4.

Таблица 4

Группы образцов

| № группы | Интервал процента армирования | Количество образцов | A_m | ρ_m , % |
|----------|-------------------------------|---------------------|-------|--------------|
| 1 | 0,2 – 0,59 | 57 | 0,80 | 0,50 |
| 2 | 0,6 – 0,81 | 55 | 0,91 | 0,75 |
| 3 | 0,82 – 1,049 | 59 | 1,01 | 0,93 |
| 4 | 1,05 – 1,25 | 58 | 1,03 | 1,13 |
| 5 | 1,26 – 1,56 | 53 | 1,16 | 1,42 |
| 6 | 1,57 – 2 | 52 | 1,31 | 1,91 |

На следующем этапе, используя полученные значения, был построен график функции зависимости A_m от процента продольного армирования ρ_m (рис. 2).

Рис 2. Функция зависимости A_m от процента продольного армирования ρ_m

Как видно из рисунка 2, предлагаемая в [4] функция учета влияния продольного армирования практически не отличается по значениям от функции, используемой в [1] и [2] для процентов армирования в диапазоне от 0,7 до 1,2, в то время как для процентов армирования более 1,2 функция (3) дает лучшее совпадение с функцией, построенной на основании опытных данных. Следовательно, можно сделать вывод о том, что использование предлагаемой функции позволит повысить точность методики расчета для процентов продольного армирования более 1,2 и тем самым снизить излишние запасы надежности, характерные для норм [1] и [2], как показали результаты, представленные в [3].

Таким образом, было принято решение оставить зависимость для расчета несущей способности железобетонных элементов при продавливании (с учетом предложенной в [3] поправки), полученную в [5]:

$$V_{Rd,c} = 0,24 \cdot k \cdot (35\rho_l + 0,65) \cdot (f_{ck})^{1/3} \cdot u \cdot d. \quad (4)$$

Количественные отношения опытных образцов к отношению опытной к теоретической нагрузке для методики расчета (4) представлены на рисунке 3, из которого видно, что распределение отношения опытной нагрузки к теоретической в общей совокупности близко к нормальному распределению. Это свидетельствует о том, что предлагаемая методика достаточно хорошо учитывает влияние всех факторов.

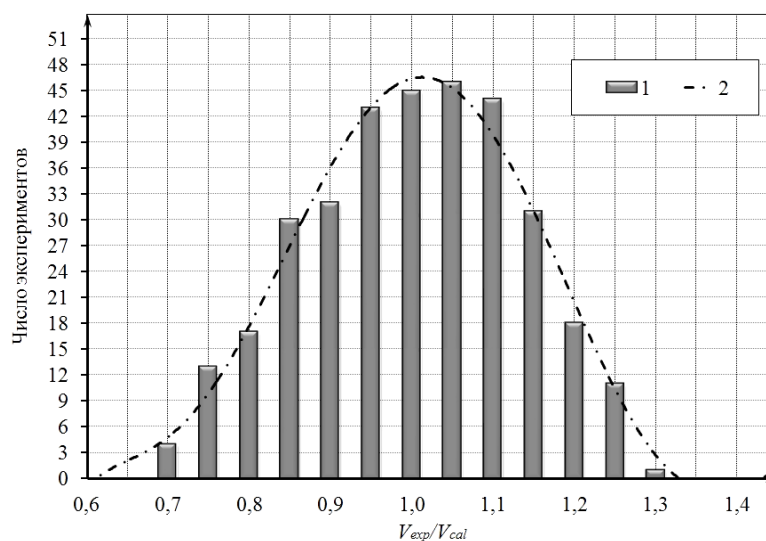


Рис. 3. Распределение отношений опытной нагрузки V_{exp} к теоретической V_{cal} для предлагаемой методики расчета и аппроксимирующая кривая.
1 – предлагаемая зависимость (4); 2 – аппроксимирующая кривая для (4)

Основные результаты оценки точности методики расчета представлены в таблице 5 и на рисунке 4. При этом для наглядности в таблице 5 также представлены значения поправки среднего значения b и коэффициента вариации величины рассеяния δ , полученные в [4], при первоначальном банке данных. На рисунке 5 представлены график отношения опытной нагрузки к теоретической в зависимости от процента армирования.

Таблица 5

Основные результаты оценки точности расчета

| Параметры | Количество образцов | |
|---------------------------------|---------------------|-------|
| | 260 | 334 |
| Поправка среднего значения b | 1,024 | 0,989 |
| Коэффициент вариации V_δ | 0,144 | 0,129 |

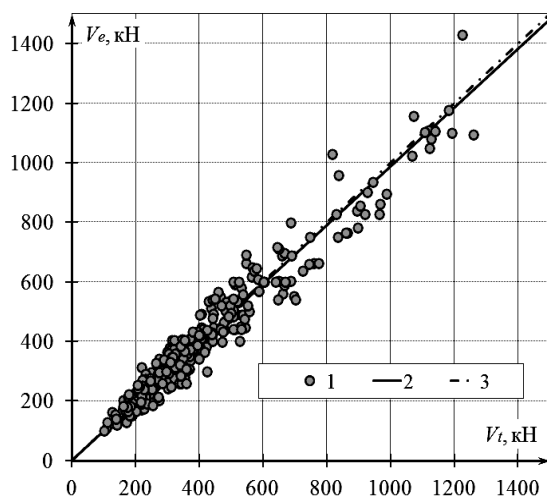


Рис. 4. Результаты сравнения экспериментальных значений несущей способности образцов V_{exp} с теоретическими по нормам [1] значениями V_{cal} :
1 – основная выборка базы данных;
2 – линия, соответствующая уравнению $V_{exp} = b \cdot V_{cal}$;
3 – линия, соответствующая равенству $V_{exp} = V_{cal}$

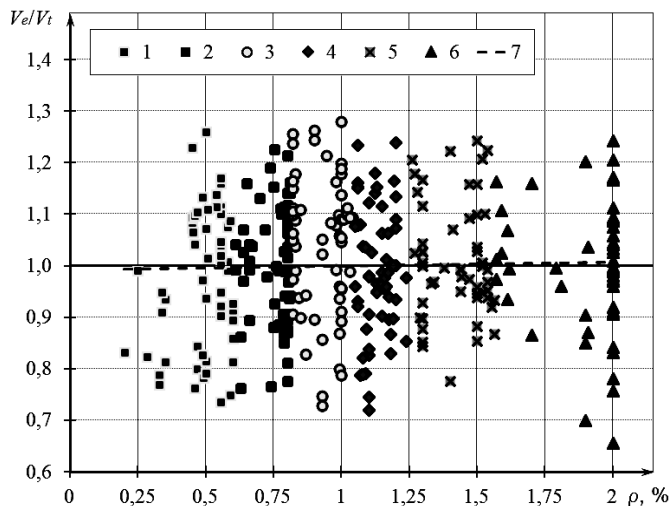


Рис. 5. Зависимость отношения экспериментальных усилий к теоретическим, рассчитанным по (4), от процента продольного армирования ρ :
1 – $\rho = 0,2 - 0,59$; 2 – $\rho = 0,6 - 0,81$; 3 – $\rho = 0,82 - 1,049$;
4 – $\rho = 1,05 - 1,25$; 5 – $\rho = 1,26 - 1,56$;
6 – $\rho = 1,57 - 2$; 7 – линия тренда

На основании представленных данных можно сделать следующий *вывод*: предлагаемая зависимость (4) дает достаточно хорошее совпадение с опытными значениями, «облако» значений располагается равномерно относительно 1 и, как видно из рисунка 5, линия тренда практически совпадает с 1.

Оценка надежности методов расчета. Оценка надежности методов расчета для норм [1; 2] была выполнена согласно [6, приложение D] с учетом изменчивости базисных переменных.

Результаты вычисления значений обеспечиваемого нормами расчета индекса надежности β приведены на рисунке 6 (для наглядности показаны только варианты вычислений при следующих исходных данных: рабочая высота сечения $d = 150$ мм; процент армирования $\rho_l = 1$ %; длина площадки нагружения $l_c = 400$ мм).

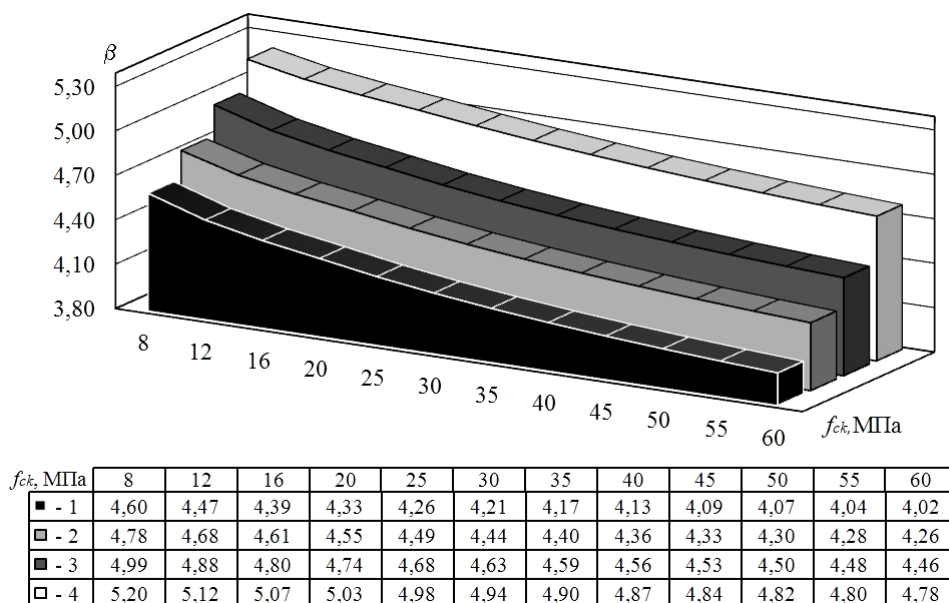


Рис. 6. Зависимость значений индекса надежности β от значений прочности бетона f_{ck} :
1 – расчет по (4); 2 – расчет по [1] при $C_{Rd,c} = 0,24$; 3 – расчет по [2]; 4 – расчет по [1]

Динамика изменения с ростом прочности бетона f_{ck} значений в определяющей степени зависит от динамики изменения значений суммарного коэффициента вариации функции сопротивления V_r , изменение значений индекса надежности β происходит нелинейно.

При расчете по методикам [1] и [2] для всего диапазона прочностей бетона наблюдается снижение значений индекса надежности.

При расчете по методике норм [1] значения β находятся в пределах 5,2 – 4,78.

При расчете по нормам [2] – в пределах 4,99 – 4,46, что указывает на чрезмерную надежность конструкций и на наличие запасов несущей способности.

При $C_{Rd,c} = 0,24$ значения индекса надежности β находятся в пределах 4,78 – 4,02, что также указывает на наличие запасов несущей способности.

При расчете по предлагаемой методике (4) для всего диапазона прочностей бетона от 8 до 25 МПа наблюдается снижение значений индекса надежности. При расчете по предлагаемой методике значения β находятся в пределах 4,6 – 4,02. Это указывает на тот факт, что предлагаемая методика также обеспечивает необходимый запас несущей способности.

Следует отметить, что по сравнению с методиками, регламентированными нормами [1] и [2], значения индекса надежности значительно меньше, что позволяет сделать *вывод* о том, что использование предлагаемой зависимости позволит снизить чрезмерные запасы несущей способности, обеспечив при этом необходимый запас при расчете железобетонных элементов на местный срез.

Заключение. С использованием дополненного (приблизительно на 30 %) банка экспериментальных данных по испытаниям на местный срез плит без поперечной арматуры, продавливаемых центрально нагруженной колонной, была выполнена оценка точности методов расчета, регламентированных нормами [1; 2], и методики расчета [1] с учетом поправок, предложенных в работе [3] согласно приложению D в [6]. Установлено, что значения b и коэффициента вариации величины рассеяния δ незначительно отличаются от значений, полученных в [3].

Установлено, что предложенная в [4] функция для учета продольного армирования позволяет обеспечить более высокую точность методики расчета железобетонных элементов при местном срезе.

Выполненная согласно положениям [6] оценка точности зависимости (3) для расчета железобетонных элементов при продавливании показала, что использование предлагаемой функции для учета продольного армирования дает хорошее совпадение с опытными значениями. Полученное значение b составляет 0,989 при коэффициенте вариации величины рассеяния δ , равном 0,129, что незначительно отличается от значений, полученных в [5].

Оценка надежности методов расчета прочности при местном срезе плит, продавливаемых центрально нагруженной колонной, показала, что представленные в нормах [1; 2] методы расчета обеспечивают излишние запасы прочности для конструкций класса надежности RC2, а предлагаемая методика не создает чрезмерных запасов прочности и обеспечивает необходимый запас несущей способности.

На основании вышесказанного можно рекомендовать использовать предлагаемую методику при разработке технических кодексов установившейся практики Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетонные и железобетонные конструкции. РУП «Стройтехнорм»: СНБ 5.03.01-02. – Минск: М-во стр-ва и архитектуры Респ. Беларусь, 2003. – 139 с.
2. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций: ТКП ЕН 1992-1-1:2009. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – 207 с.
3. Рак, Н.А. Анализ методов расчета прочности элементов из тяжелого бетона без поперечной арматуры при продавливании / Н.А. Рак, С.Ю. Тамкович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2010. – № 12. – С. 64 – 72.
4. Тамкович, С.Ю. Влияние процента продольного армирования при расчетах на местный срез железобетонных элементов / С.Ю. Тамкович // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III Междунар. симпоз. – Минск: Минсктиппроект, 2011. – Т. 1. – С. 367 – 374.
5. Рак, Н.А. Оценка надежности расчета железобетонных элементов при продавливании при использовании линейной зависимости для учета влияния / Н.А. Рак, С.Ю. Тамкович // Вестн. БрГТУ. – 2012. – № 1 (73): Строительство и архитектура. – С. 171 – 175.
6. Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций: СТБ ЕН 1990-2007 / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2008. – 64 с.

Поступила 15.05.2012

ANALYSIS OF PRESS DURABILITY CALCULATING METHODS FOR THE ITEMS MADE FROM HEAVY CONCRETE WITHOUT CROSS-SECTION ARMATURE WITH A USE OF EXPANDED BANK OF EXPERIMENTAL DATA

N. RAK, S. TAMKOVICH

On a base of a use of expanded experimental databank it is executed the estimation of calculation accuracy for design codes operating in Belarus. The index of design reliability is determined by calculating these design codes. Based on the analysis offers on perfection of methods of punching shear strength calculation of reinforced concrete slabs are given.